

OBTENÇÃO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS EM PLACAS LAMINADAS A FRIO

Sérgio Henrique Evangelista

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : todty@sc.usp.br

Alexandre Tácito Malavolta

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : alexandr@sc.usp.br

Mariano Eduardo Moreno

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : mmoreno@sc.usp.br

João Lirani

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : lirani@sc.usp.br

Hazim A. Al-Qureshi

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, C.P. 476, CEP 88040-900, Florianópolis – S.C. email : hazim@materiais.ufsc.br

Resumo. *A conformação mecânica dos metais apresenta-se entre os mais importantes processos de fabricação devido à possibilidade de obterem-se produtos com mínimo de perdas, com razoável produtividade e com boas propriedades mecânicas finais. Cita-se, dentre estes, o processo de laminação de perfis em geral. A análise numérica via Elementos Finitos deste processo abrange uma série de desafios de ordem matemática e computacional, de modo que o que é disponível atualmente na literatura tenha que ser constantemente aprimorado. Um problema relevante aqui abordado é o estudo e obtenção de perfis de tensão residual deixados pelo processo no material. A interação entre as propriedades mecânicas na região elasto-plástica juntamente com outras variáveis, como por exemplo o caso do contato rolo-placa, contribuem para que o perfil de tensão residual ao longo da espessura tenha caráter bem complexo. Através de análises numéricas do problema em questão, estuda-se a energia acumulada e o retorno elástico em um caso de laminação a frio de placa de alumínio. Sem se considerar o efeito das modificações termo-mecânicas na micro-estrutura do material, tem-se por objetivo a obtenção do perfil final de tensão residual ao longo da espessura desta placa. Com isto, analisa-se também numericamente e discute-se a influência deste perfil na distorção geométrica de um caso simples de peça obtida a partir da placa estudada.*

Palavras-chave: laminação de placas, método dos elementos finitos, tensões residuais.

1. INTRODUÇÃO

Uma maior demanda por análises numéricas de processos de conformação mecânica é encontrada na indústria e nos centros de pesquisa, uma vez que estes processos são exigidos em termos de desempenhos melhores no produto final e custos menores. A execução destas análises

tem sido possibilitada devido a uma maior disponibilidade de *softwares* implementados por Elementos Finitos, bem como por um constante desenvolvimento do estado da arte relativo às considerações feitas sobre as variáveis destes processos.

No caso da laminação de placas há uma motivação maior devido ao fato de este processo ser empregado na fabricação de peças para os mais diversificados fins. Entretanto, para este processo são encontradas dados restritos a respeito de implementação de análises numéricas via Elementos Finitos (*EF*). Entretanto, informações a respeito das tensões residuais deixadas no material e a respeito dos procedimentos corretivos são encontradas em diversos autores, tais como em Tanner et al⁽¹⁾ e Wang et al⁽²⁾. As peças usinadas a partir de ligas com valores consideráveis de tensões residuais e energia elástica armazenada experimentam o fenômeno do empenamento. Este pode ser considerado como a distorção geométrica apresentada por uma peça no restabelecimento de uma nova condição de equilíbrio após remoção de material da placa laminada. Esta definição é geral e é mais conveniente quando são desprezados os efeitos dos fenômenos diversos relativos à laminação como por exemplo os aspectos micro-estruturais e aspectos térmicos devido à laminação a quente.

Neste trabalho são verificados alguns dos requisitos para implementação numérica do processo de laminação de placas e do estiramento adicional dado como procedimento corretivo. Busca-se com isto obter os perfis de tensões residuais deixadas na placa após a laminação, com e sem o estiramento adicional. A análise numérica é feita sobre o processo de laminação a frio, simplificação adotada com o objetivo de validar o método a ser descrito. Em trabalhos futuros serão considerados outros aspectos.

Finalmente, é apresentado um procedimento para implementação posterior, via *EF*, do estudo do empenamento em uma peça-exemplo, tomando-se como carregamento inicial os conjuntos de perfis de tensão residual determinados. Considera-se que tais perfis não são modificados pela influência das etapas de retirada de material, atribuídos aos processos de fabricação via remoção de cavacos.

2. METODOLOGIA

A análises por *EF* foram implementadas nos *softwares LS-DYNA 970®* e *ANSYS 7.0®* (versões acadêmicas) disponíveis no Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional, no Depto. de Engenharia Mecânica, USP – São Carlos. O equacionamento no *LS-DYNA* é baseado na formulação *Lagrangiana* atualizada para solução explícita do sistema de equações do problema dinâmico, Hallquist⁽³⁾, aplicação utilizada no processo de laminação e nos estiramentos feitos adicionalmente. No *ANSYS*, o alívio de tensões na placa e a determinação do empenamento da peça de exemplo são obtidos implicitamente sob o foco da formulação *Lagrangiana* total para uma resposta linear e estática destes materiais, Ansys⁽⁴⁾. A apresentação das equações está fora do escopo deste trabalho, mas são encontradas as definições gerais e adequadas em Bathe⁽⁵⁾.

Os dados a seguir referem-se às condições necessárias para a implementação das análises.

O processo de laminação em questão foi implementado no software *LS-DYNA*. Para tal, utilizou-se o seguinte:

- malha criada com ¼ do modelo devido às simetrias e considerações adequadas das condições de contorno na lateral e na face inferior da placa, vide modelo na Figura 1;
- geometria : placa com espessura total de 86 mm e largura total de 1000 mm. (devido às condições de simetria, estas medidas são respectivamente 43 x 500 mm, como na Figura 1); o rolo foi gerado com diâmetro de 1000 mm e comprimento de 1400 mm;
- propriedades de material e elementos escolhidos : rolo, material rígido e elemento *SHELL163*; placa, propriedades para alumínio com comportamento elástico, perfeitamente plástico, sendo módulo de *Young* de 0.49e11 N/m², *Poisson* de 0.33 e tensão de escoamento de 36 MPa, com elementos *SOLID164*;
- condições dinâmicas de processo : velocidade de rotação do rolo de 80 rpm.

A partir do que foi apresentado, foram definidos 3 casos de análises, cada qual formado por uma seqüência concatenada, isto é, com resultados de uma etapa transferidos para a etapa posterior:

- **caso 1:** análise do processo de laminação (*LS-DYNA*) e alívio de tensões (procedimento explícito-implícito) em simulações posteriores no *ANSYS* para somente a malha da placa;
- **caso 2:** análise do processo de laminação (*LS-DYNA*), re-início da análise através do acréscimo de 2% de estiramento adicional (*LS-DYNA*) com modificação nas condições de contorno da placa, e posterior alívio de tensões (procedimento explícito-implícito) em simulações posteriores no *ANSYS* para somente a malha da placa;
- **caso 3:** análise do processo de laminação (*LS-DYNA*), re-início da análise através do acréscimo de 3% de estiramento adicional (*LS-DYNA*) com modificação nas condições de contorno da placa, e posterior alívio de tensões (procedimento explícito-implícito) em simulações posteriores no *ANSYS* para somente a malha da placa.

No final de cada caso estudado foram obtidos os perfis de tensão residual na placa, nas direções longitudinal (x), transversal (y) e cisalhamento (xy). Assim, estas informações são gravadas adequadamente para uso nas análises posteriores.

Para o estudo do empenamento, criou-se uma malha de uma peça simples com elementos *SOLID45* no *ANSYS*, mostrada na Figura 2. Sobre cada elemento, as tensões determinadas são aplicadas como carregamentos iniciais (tensões iniciais) nas novas análises. Neste caso, é necessário posicionar-se adequadamente o envelope da peça da Figura 2 (50 mm de espessura) na placa (86 mm de espessura), o que implica na escolha de translações e rotações segundo os eixos coordenados.

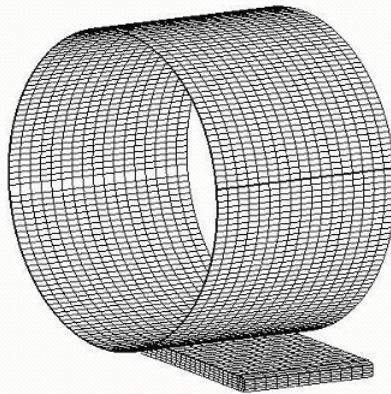


Figura 1. Malha *EF* com $\frac{1}{4}$ da geometria para o problema da laminação.

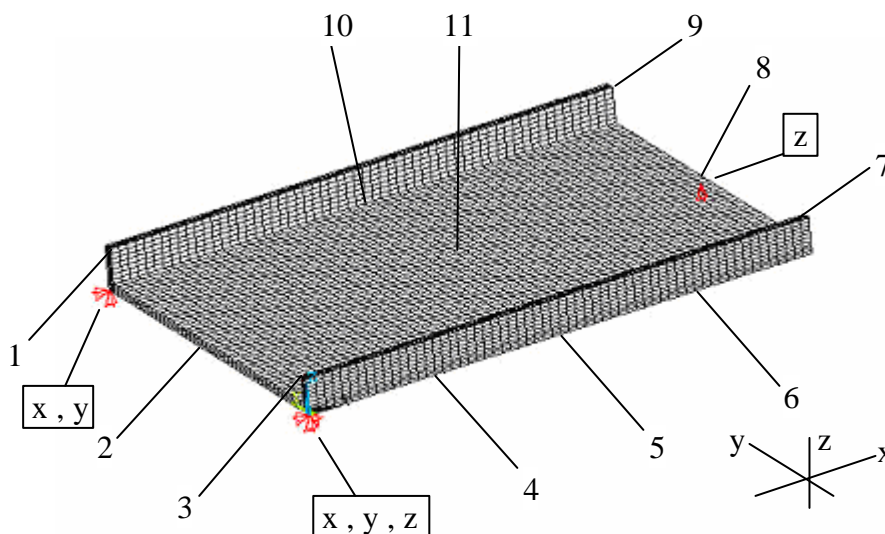


Figura 2. Malha para a análise de empenamento, condições de contorno e nós para análise.

Os valores escolhidos para este trabalho são zero para a translação e zero para as rotações, de modo que o eixo x da peça seja alinhado com a direção longitudinal da placa e as faces inferiores de ambas coincidam. Isto implica diretamente no mapeamento de tensões para cada elemento da peça em relação à sua posição na espessura da placa. Nesta figura são indicados também os nós para análise de deslocamentos na direção z (empenamento), bem como os 3 nós em que foram aplicadas as restrições de deslocamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 é apresentada a distribuição de tensão equivalente (*Von Mises*) para uma etapa intermediária no processo de laminação. Nesta figura é evidente a região em contato com os rolos, a qual sofre o escoamento (franjas de 36 MPa). Na Figura 4 tem-se o padrão do gradiente de tensão longitudinal para uma análise de estiramento posterior à laminação. Nesta figura observam-se as franjas de compressão longitudinais na porção central devido aos contatos com os rolos.

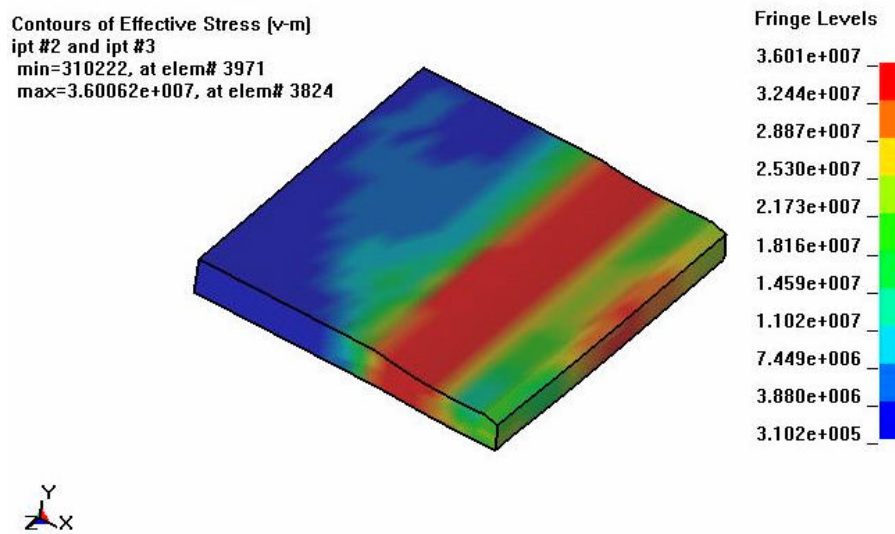


Figura 3. Distribuição de tensões equivalentes - laminação (valores em MPa).

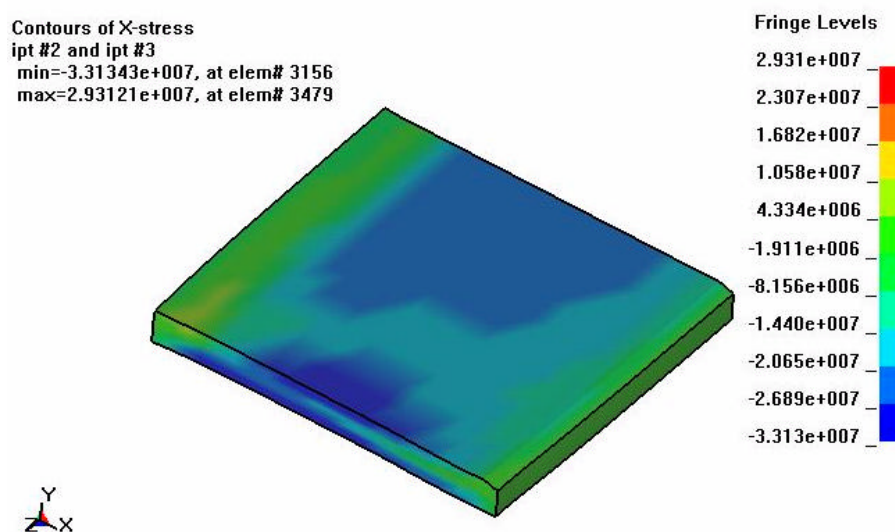


Figura 4. Distribuição de tensões equivalentes - após o estiramento (valores em MPa).

Na Figura 5 é mostrado o padrão das análises de alívio de tensões feitas no ANSYS. Nesta figura são indicadas as regiões onde foram aplicadas as novas condições de vinculação.

```

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =3
TIME=.123623
SX      (AVG)
RSYS=0
DMX = .524916
SMN = -255162
SMX = .430E+08
U

```

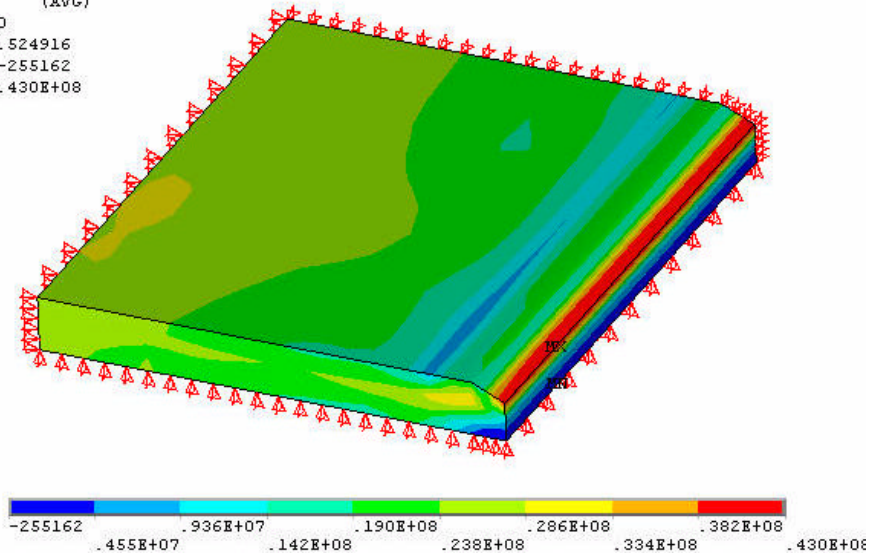


Figura 5. Distribuição de tensões longitudinais (valores em MPa).

A importância da execução das operações adicionais de estiramento e das análises de alívio de tensões é mostrada pelo seguinte. Na Figura 6 tem-se o gráfico das tensões longitudinais contra a posição na espessura da placa nas seguintes situações do caso 3: após a laminação, após o estiramento e após o alívio de tensões. Pode-se verificar que a imposição do estiramento adicional reduz consideravelmente os valores das tensões após a laminação. Entretanto, pode-se verificar que o novo equilíbrio, dado após o alívio de tensões, é obtido através de um compromisso entre a distribuição inicial de tensões e as modificações sutis na geometria da placa, ao preço de uma inversão na curvatura do perfil de tensões para a situação relaxada do caso 3.

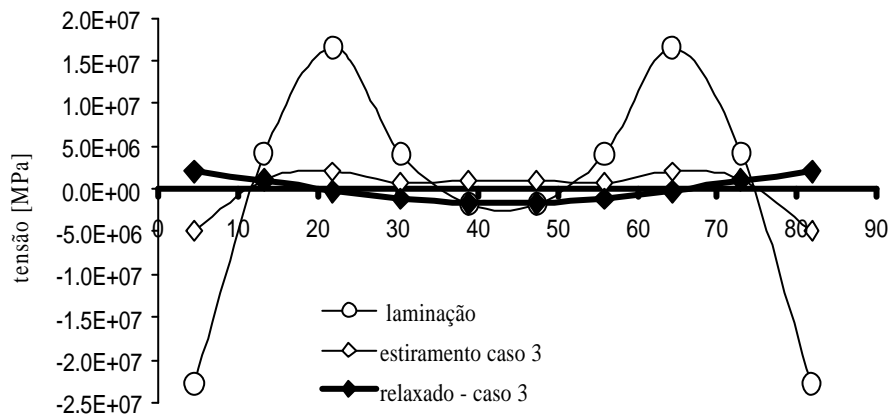


Figura 6. Tensões longitudinais no caso 3.

Nas Figuras 7,8 e 9 são apresentados os conjuntos dos perfis gerais de tensão para os casos de análises 1, 2 e 3, respectivamente. Cada conjunto é composto pelos valores médios das tensões longitudinal, transversal e de cisalhamento, esquematizadas nos gráficos ao longo da espessura da placa.

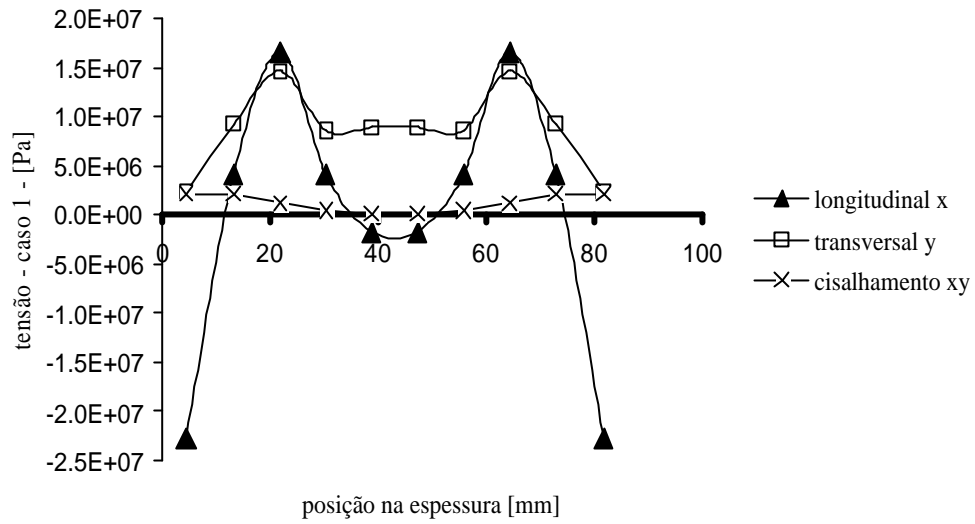


Figura 7. Tensões médias para o caso 1.

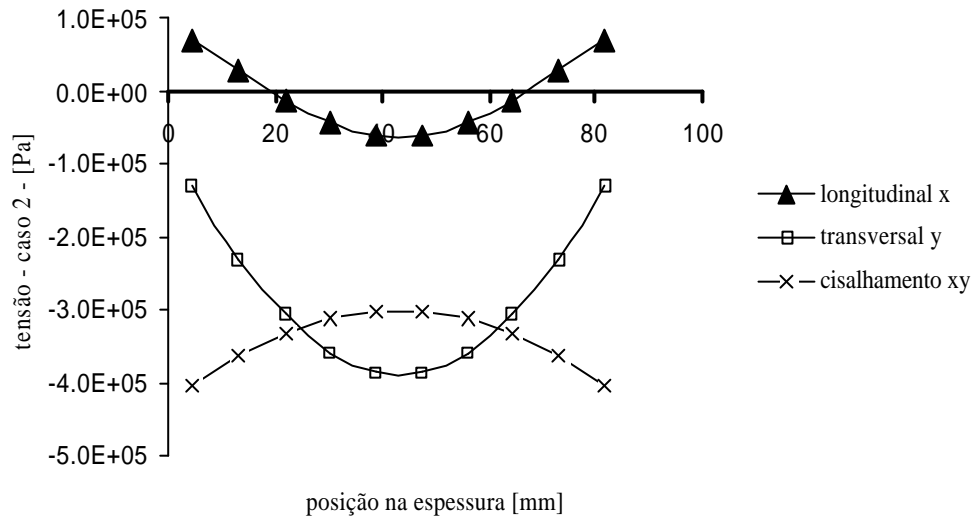


Figura 8. Tensões médias para o caso 2.

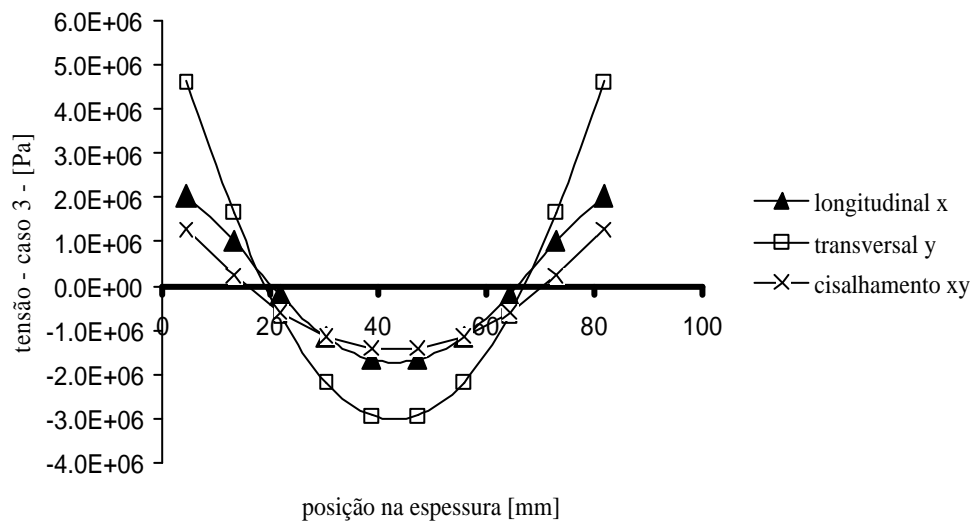


Figura 9. Tensões médias para o caso 3.

Os valores em geral são observados como sendo menores nos casos 2 e 3, devido à aplicação dos estiramentos adicionais.

A partir do que foi apresentado, foram utilizados os valores médios de tensão, obtidos em cada caso, para mapeamento e a aplicação dos carregamentos para as análises de empenamento, feitas no ANSYS. Os padrões de resultados (deslocamentos na direção z, normal à placa) são observados nas Figuras 10, 11 e 12, para os casos 1, 2 e 3 respectivamente.

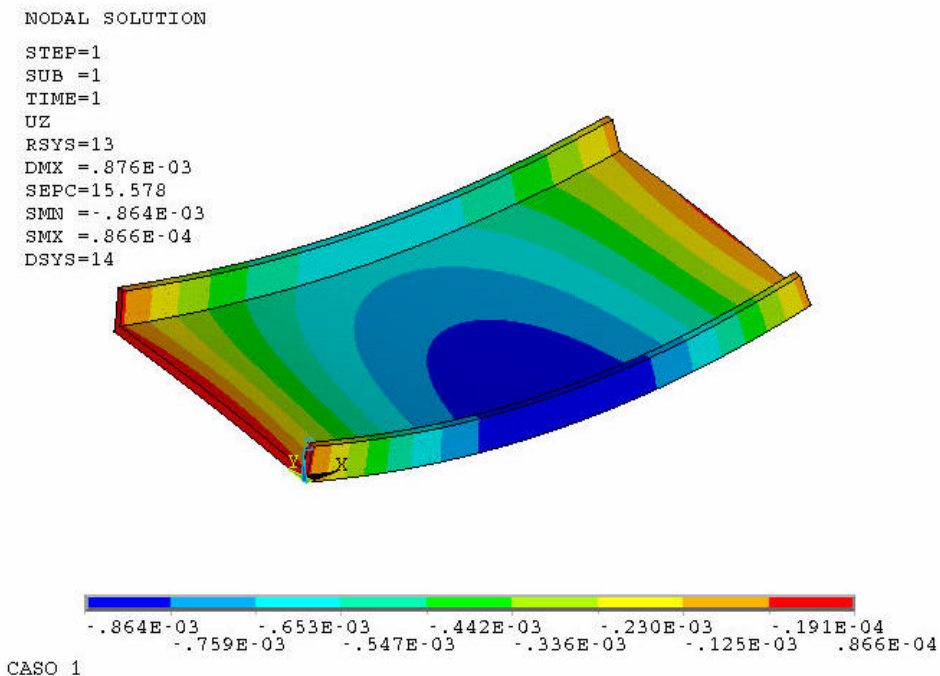


Figura 10. Deslocamentos na direção Z, caso 1.

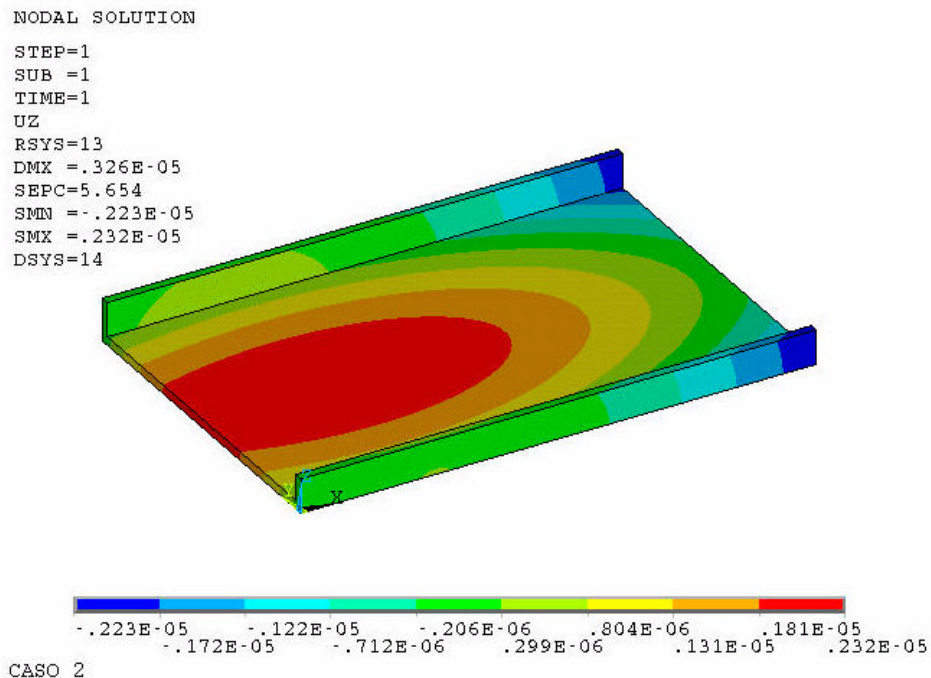


Figura 11. Deslocamentos na direção Z, caso 2.

```

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ
RSYS=13
DMX =.735E-04
SEPC=9.122
SMN =-.643E-04
SMX =.663E-04
DSYS=14

```

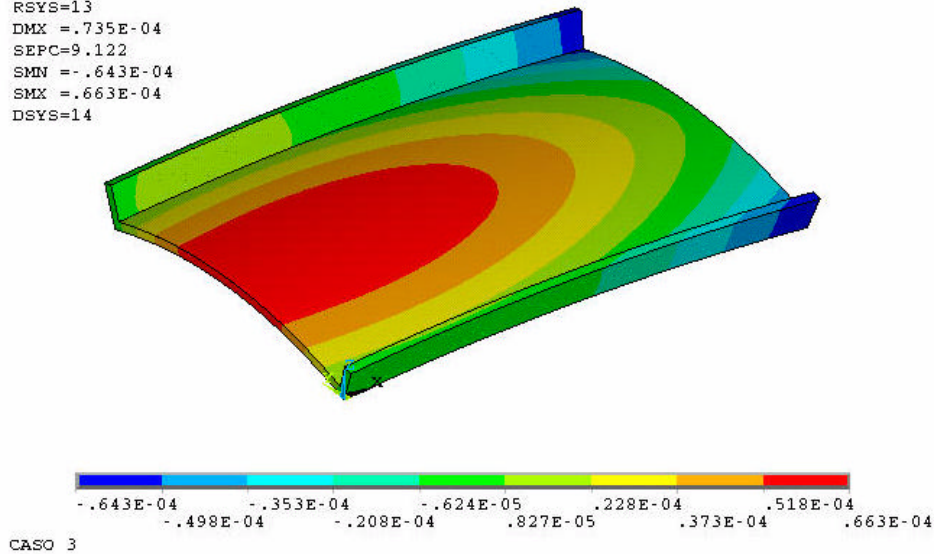


Figura 12. Deslocamentos na direção Z, caso 3.

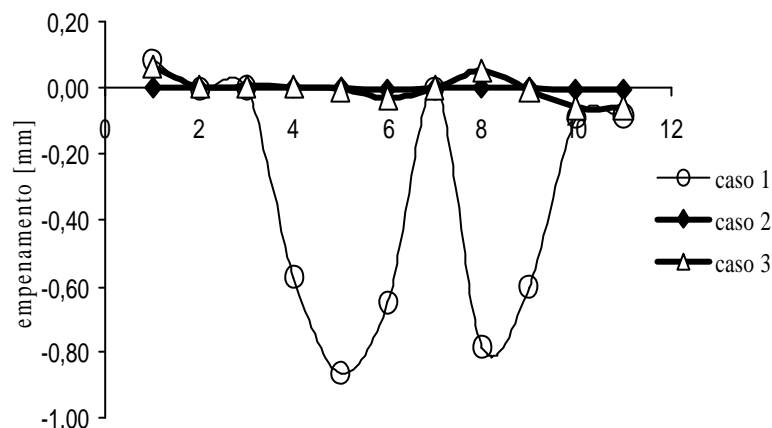


Figura 13. Empenamentos previstos para os pontos escolhidos.

Em geral, observa-se que os perfis com os maiores valores nas tensões residuais implicam na obtenção de peças finais com maior preponderância nos valores de empenamento. Isto é observado melhor na Figura 13, na qual os pontos escolhidos da Figura 2 têm seus valores de deslocamentos finais na direção z (normal à placa) esquematizados de forma ordenada e para cada caso. Os pontos 5 e 8 possuem os maiores empenamentos previstos (da ordem de 0,80 mm) no caso 1. A importância dos estiramentos adicionais é novamente verificada nos casos 2 e 3, quando são observados empenamentos previstos com valores mínimos, próximos aos erros de fabricação comuns. Observa-se ainda que o padrão do perfil de tensões residuais pode provocar uma modificação na curvatura da peça empenada, fato verificado nos casos 1 e 3.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma forma de se realizar uma concatenação de análises numéricas por *EF*, de acordo com uma seqüência de processos mecânicos discutidos. A metodologia mostrou-se adequada para aplicação na indústria e em pesquisas futuras. Verificou-se que, através da transferência adequada de informações de uma etapa de análise para outra, pode-se obter resultados interessantes na obtenção de diagnósticos sobre os processos.

Particularmente, foi mostrado como se proceder na determinação de distorções geométricas e como obter procedimentos convenientes para minimização do problema. A metodologia empregada mostrou-se coerente segundo as hipóteses e condições adotadas.

Posteriormente, podem ser estudadas condições mais realísticas na laminação de placas tais como a inclusão do efeito da temperatura em etapas a quente e a frio. Pode-se verificar também o encruamento gradual e a execução de passes adicionais na laminação, incluindo o processamento da direção transversal. Por outro lado, será tratado também do estudo de novas soluções para o empenamento, inclusive da utilização de translações e/ou rotações na peça como tentativa de mapeá-la em faixas mais convenientes dos perfis de tensão residual calculados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP pela utilização dos recursos do LaMAC – Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional, e à Capes, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

6. REFERÊNCIAS

1. TANNER, D.A.; ROBINSON, J.S. Modelling stress reduction techniques of cold compression stretching in wrought aluminum alloy products. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 39, p. 369-386, 2003.
2. WANG, Z.; GONG, B. Residual Stress in the Forming of Materials. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. 1.ed. Metals Park, Ohio, 2002, p. 141-149.
3. HALLQUIST, J.O. **LS-DYNA Theoretical Manual**. Livermore Software Technology Corporation., 1998, 498 p.
4. ANSYS. Theory reference. **Ansys Incorporated**. 2002.
5. BATHE, K. J. **Finite element procedures**. New Jersey, Prentice Hall, 1996, 1037 p.

PREDICTION OF RESIDUAL STRESS PROFILES ON COLD ROLLED PLATES THROUGH FINITE ELEMENT METHOD

Sérgio Henrique Evangelista

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : toddy@sc.usp.br

Alexandre Tácito Malavolta

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : alexandr@sc.usp.br

Mariano Eduardo Moreno

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : mmoreno@sc.usp.br

João Lirani

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : lirani@sc.usp.br

Hazim A. Al-Qureshi

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, C.P. 476, CEP 88040-900, Florianópolis – S.C. email : hazim@materiais.ufsc.br

Abstract. *The metal forming operations are ranked among the most important mechanical manufacturing processes. This fact is considered due to several factors, such as the possibility of reaching near net shapes, suitable productivity and good mechanical properties on final formed parts. By this way, the finite element analyses of rolling processes demand constant improvements on the mathematical and computational aspects. An important problem in this case is focused on the prediction of residual stress profiles through the thickness, as results of complex elasto-plastic behaviour of the plates in the compression contacting zones. These sort of stresses cause geometrical distortions on the final machined parts, obtained from the rolled plates. In this work, it is verified by numerical analyses the springback behaviour of the aluminum plates after cold rolling processes and after additional stress relieving operations. The prediction of the residual stresses through thickness of the plates is made through the focus of continuum mechanics. However, some aspects such as anisotropy and local phenomena occurring in the microstructure of the material are neglected. Finally, some applications are presented through numerical analyses of a simple part.*

Keywords: *rolling of plates, finite element method, residual stress.*